

Enrico Fermi: de les partícules a l'astrofísica

Antoni Hernández-Fernández^{1,2}

¹ Complexity and Quantitative Linguistics Lab, Laboratory for Relational Algorithmics, Complexity and Learning (LARCA), Institut de Ciències de l'Educació, Universitat Politècnica de Catalunya, Campus Nord, Edifici Vèrtex, Plaça Eusebi Güell 6, 08034 Barcelona. antonio.hernandez@upc.edu

² Escola Municipal d'Art i Disseny de Terrassa, Carrer Colom 114, 08222 Terrassa (Barcelona).

Enrico Fermi (1901-1954) va revolucionar la física del segle XX tot capitanejant el desenvolupament de la física nuclear i de partícules, disciplines que, com veurem, va connectar amb l'astronomia, entre d'altres matèries, sent així, potser sense voler, un dels pares de l'astrofísica moderna. Fermi va *mirar el cel* i el va escrutar cercant les evidències experimentals que la seva física requeria per a ser validada empíricament. I és que Fermi va ser un autèntic físic tot terreny capaç de connectar allò més petit amb els objectes més mastodòntics de l'Univers conegut; es va convertir en el primer enginyer nuclear de la història, no només col·laborant activament en el Projecte Manhattan on desenvolupà la bomba atòmica, sinó també ajudant al perfeccionament dels primers acceleradors de partícules i essent l'artífex del primer reactor nuclear, la Chicago Pile 1. La seva comprensió del món subatòmic li portà a analitzar en detall i a comprendre els rajos còsmics, que es van entendre llavors com un autèntic laboratori natural de partícules, i que Fermi va ser finalment capaç de reproduir a un dels primers sincrociclotrons, desenvolupat també a Chicago.

Primers anys (1921-1932): Fermi descobreix que cal mirar el cel

Ben jove, entre 1921 i 1926, mentre es gestava la revolució quàntica, Fermi va interessar-se profundament per la relativitat general, la quàntica i va treballar-hi també en la interpretació dels experiments i models incipients que se succeïen llavors en la física nuclear. Així, en 1921, a dos articles consecutius a la revista *Il Nuovo Cimento* va defensar la teoria de la relativitat general d'Albert Einstein (1879-1955) quan encara era discutida (Fermi 1921a, Fermi 1921b).

A "*Sulla dinamica di un sistema rigido di cariche elettriche in moto traslatorio*"¹, Fermi contraposà el principi d'equivalència massa-energia d'Einstein amb el càlcul de la massa efectuat a la teoria de Lorentz, generant-ne així una aparent contradicció teòrica que resolldria un any més tard a un article que va ser publicat a la prestigiosa revista alemanya de física *Physikalische Zeitschrift*. A l'altra article de 1921, "*Sull'elettrostatica di un campo gravitazionale uniforme e sul peso delle masse elettromagnetiche*"², Fermi discutia mitjançant la relativitat l'efecte d'un camp gravitatori uniforme i estàtic en un sistema de càrregues elèctriques, demostrant que les càrregues tenen una massa electromagnètica igual a la seva massa material, és a dir $m=U/c^2$ (sent U l'energia electrostàtica del sistema i c la velocitat de la llum en el buit), en perfecta concordança amb el principi d'equivalència d'Einstein.

En anys successius Fermi estudià en detall la radiació electromagnètica i els fenòmens quàntics³ i es començà a interessar per l'astrofísica com a font natural de partícules, rajos X i d'altres radiacions ionitzants que, d'altra banda, tant costava generar en els laboratoris de l'època. De fet, el 7 de juliol de 1922, Fermi es graduà *cum laude* en física, amb una recerca experimental sobre difracció de rajos X, després d'haver publicat l'any anterior un article de revisió especialitzat, sobre "Els raigs Röntgen" a *Il Nuovo Cimento*⁴.

En 1923 Fermi va col·laborar a l'edició italiana de "*Els fonaments de la relativitat einsteniana*", reconeixent "L'enorme rellevància conceptual de la teoria de la relativitat", davant l'escepticisme de bona part de la comunitat científica italiana. Fermi estava ja captivat pel potencial d'obtenció d'energia partint de la matèria, per les conseqüències

¹ "Dinàmica d'un sistema rígid de càrregues elèctriques en moviment translacional" (Fermi, 1921b).

² "Electrostàtica d'un camp gravitatori uniforme i el pes de la massa electromagnètica" (Fermi 1921a).

³ Veure, per a una revisió de treballs d'aquesta època i següents, tant les revisions de Bernardini & Bonolis (2004), com els treballs en línia disponibles a: http://fisica.unipv.it/percorsi/biography.asp?nome=Enrico&cognome=Fermi&anno_i=1901&anno_f=1954

⁴ També disponible a l'enllaç de la nota anterior.

d'aquella equació, $E = m \cdot c^2$, i sostenia llavors, premonitòriament: "No sembla possible, almenys en un futur proper, trobar un camí per obtenir semblants quantitats d'energia -i que sigui tot bo- ja que el primer efecte de l'explosió d'una quantitat tan terrible d'energia seria aixafar en mil bocins al físic que tingués la desgràcia de trobar-ne el camí de fer-ho." Qui sap si estava ja pensant en controlar aquella explosió, la seva major contribució a la ciència, el domini de les reaccions nuclears (Hernández-Fernández, 2013). Una estada l'any següent, el 1924 a Leiden, acollit per Paul Ehrenfest (1880-1933), li va permetre trobar-se amb el propi Einstein, amb qui va intercanviar impressions sobre l'estat de la teoria de la relativitat i la seva connexió amb la mecànica quàntica i la física nuclear.

Fermi però no només es dedicava a la física teòrica: no oblidà mai la rellevància de l'experimentació, com demostrà amb la recerca desenvolupada amb el seu company i amic Franco Rasetti (1901-2001), amb qui va explorar en paral·lel les tècniques d'estudi dels espectres atòmics, publicant a *Nature* "*Effect of an Alternating Magnetic Field on the Polarisation of the Resonance Radiation of Mercury Vapour*" (Fermi & Rasetti, 1925)⁵, on tots dos demostraven els efectes que el camp magnètic causa sobre la llum emesa en l'espectre del mercuri. La seva tècnica s'aplicaria amb èxit en l'estudi d'espectres electromagnètics, una de les línies de recerca més consolidades en l'estudi de l'astrofísica estel·lar moderna.

Fermi va publicar en 1926 una de les contribucions més rellevants a la física (Fermi, 1926): "*Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico*"⁶, en la qual definia la teoria d'un gas ideal monoatòmic que obeïa el principi d'exclusió de Pauli. Fermi va idear llavors un nou mètode per comptar les partícules d'espín no sencer (com els electrons, neutrons i protons, per exemple), permetent només una partícula per nivell, de manera que no pogués haver-hi més d'una partícula amb els mateixos nombres quàntics. La distribució de Fermi és així una funció que determina estadísticament com es situen les partícules en els orbitals atòmics, de manera que es van col·locant des del nivell més baix d'energia cap amunt, sempre respectant el principi d'exclusió de Pauli, fins que totes s'han distribuït. Paul Dirac (1902-1984) va desenvolupar poc després el mateix tipus d'estadística, de manera que tant aquesta com la distribució anterior es coneixen com a "estadística i distribució de Fermi-Dirac", encara que el propi Dirac insistia en parlar d'estadística de Fermi, en haver-la publicat abans el físic italià (Hernández-Fernández, 2013). La distribució de Fermi-Dirac permet explicar les propietats conductores dels metalls, com ja va mostrar en aplicar-la Arnold Sommerfeld (1868-1951), i el mateix Wolfgang Pauli (1900-1958), el 1927, a l'anàlisi dels electrons lliures en un metall.

No obstant, la primera aplicació coneguda de l'estadística de Fermi, és deguda a Ralph H. Fowler (1889-1944) que el mateix any, al desembre de 1926, en el seu article "*On dense matter*" la va utilitzar amb èxit en astrofísica, estudiant el fenomen del col·lapse estel·lar. Fowler va demostrar que el gas d'electrons lliures contingut en una estrella nana blanca era un "gas de Fermi degenerat", és a dir, en definitiva un gas que seguia fil per randa la distribució de Fermi (Fowler, 1926).

En el seu article "*Sulla deduzione statistica de alcune proprietà dell'atomo*"⁷, Fermi va proposar el que es coneix com a model atòmic de Thomas-Fermi, ja que Lewellyn H. Thomas (1903-1992) havia plantejat un model similar un any abans, tot i que Fermi desconeixia completament el treball de Thomas. La simplicitat del model de Thomas-Fermi

⁵ "Efecte d'un camp magnètic altern en la polarització de la radiació de ressonància del vapor de mercuri" (Fermi & Rasetti, 1925).

⁶ "Sobre la quantització del gas perfecte monoatòmic" (Fermi, 1926).

⁷ "Un mètode estadístic per a la determinació d'algunes propietats de l'àtom" (Fermi, 1928).

funcionava molt bé amb els electrons lliures dels metalls, ja que explicava la bona conductivitat elèctrica que presenten aquests materials.

Sorprenentment, com demostraria en 1930 l'eminent astrofísic d'origen hindú Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995), el model de Thomas-Fermi era també un model excel·lent per a explicar el comportament de les estrelles nanes blanques que no col·lapsen gravitatòriament, en refredar-se en els seus processos d'evolució estel·lar⁸. I és que l'energia total del gas de Fermi en el zero absolut és major que la suma de les energies dels estats fonamentals de les partícules aïllades, pel fet que el principi de Pauli actua com una pressió que manté els fermions separats però en moviment. Per tant, la pressió d'un gas de Fermi és no nul·la fins i tot en el zero absolut: és l'anomenada pressió de Fermi, o pressió de degeneració, la qual per exemple, segons va demostrar Chandrasekhar, estabilitza un estel i només quan l'estrella és prou massiva per superar la pressió de Fermi pot llavors col·lapsar (en una singularitat o forat negre, diríem actualment). En definitiva, el model de Thomas-Fermi va proporcionar una bona descripció de la densitat atòmica i va justificar que qualitativament la mida de tot element material s'estableix com a conseqüència de l'equilibri que es dona entre les forces externes (electromagnètiques o gravitatòries, segons estudiem fenòmens quàntics o astronòmics) i la pressió de Fermi.

Finalment, s'ha d'afegir que Fermi posseïa una mentalitat moderna pel que fa a la divulgació científica, a la necessitat de comunicar la ciència a la societat per part dels investigadors, en una Itàlia on calia recórrer un llarg camí cap a l'alfabetització general de la població, i que, pel que fa a la física, requeria un apropament cap a la quàntica i la relativitat que eren encara desconegudes quan no rebutjades. Així, entre 1928 i 1930, Fermi publicà moltes obres tant de docència de la física d'aquestes disciplines (que potser ara anomenaríem "llibres de text") com de divulgació i, entre elles, una dedicada als "*Àtoms i estrelles*" (Hernández-Fernández, 2013). I és que Fermi havia entès que necessitava mirar al cel per aconseguir entendre la natura i connectar l'univers de l'àtom amb el de les galàxies.

El salt nuclear (1933-1945): el cel atòmic

El 1933 Fermi va publicar un article crucial per a la física de partícules a *La Ricerca Scientifica*: "*Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi "beta"*". És probable que la modèstia del títol fos conseqüència de que l'article va ser primer rebutjat per *Nature*, argumentant els revisors que "contenia especulacions massa allunyades de la realitat física per ser de l'interès del lector". Fermi ampliaria l'article posteriorment en una publicació en *Il Nuovo Cimento* i en 1934 va ser traduït a l'alemany a la prestigiosa "*Zeitschrift für Physik*" (Hernández-Fernández, 2014). El treball pioner de Fermi considerava la creació i destrucció de partícules en la desintegració beta, descrita abans per la teoria quàntica de Dirac. Encara hi havia certa reticència (com van demostrar els editors de *Nature*) a acceptar que partícules com els electrons es poguessin crear i destruir amb facilitat de la mateixa manera que succeïa amb els fotons.

Tot i que a la teoria de camps era habitual la descripció de fenòmens amb la creació i destrucció de partícules, va ser el treball de Fermi el que per primera vegada l'aplicava més enllà dels fotons. Les anomenades interaccions febles són fonamentals en

⁸ Com veurem, Chandrasekhar i Fermi es trobarien posteriorment, per atzars del destí, a la Universitat de Chicago.

⁹ "Temptativa d'una teoria dels raigs β " (Fermi, 1933).

l'univers físic tal com el coneixem. Fermi i Pauli havien donat amb una interacció fonamental de la natura: les estrelles com el Sol produeixen energia mitjançant la fusió nuclear, que consisteix en reaccions nuclears com ara la unió de dos àtoms de deuteri per obtenir heli i energia. Així per exemple, el fet que siguin necessàries reaccions d'interacció feble prèvies a la formació dels materials físsils garanteix que l'hidrogen del Sol es cremi més a poc a poc, regulant l'activitat solar i augmentant la vida de l'estrella (Hernández-Fernández 2013).

Fermi no perdia de vista la relació del seu descobriment amb les radiacions còsmiques. Va aprofitar l'estada a Roma en 1933 de Bruno Rossi (1905-1993), que era conegut per haver desenvolupat un sistema per a detectar trajectòries de partícules còsmiques, per publicar amb ell un article sobre l'acció del camp magnètic terrestre sobre la radiació penetrant, en el qual ambdós explicaven tant els efectes geomagnètics de la latitud com de la longitud sobre la radiació còsmica que arribava a la Terra. Fermi va estudiar el 1939 l'absorció anòmala dels rajos còsmics en l'aire, i es va posar ràpidament mans a l'obra per desentranyar el misteri, el que va aconseguir llavors però no va fer públic fins dos articles publicats bastants anys més tard a *Physical Review*, el 1947, primer amb Edward Teller (1908-2003) i Victor Weisskopf (1908-2002), que de forma independent havien arribat a la mateixa conclusió, i després publicant només amb Teller (Fermi et al, 1947; Fermi & Teller, 1947).

Cal pensar que la feina era feta molt abans, doncs va haver-hi un parèntesi important en les publicacions científiques d'aquells anys, entre 1939 i 1945, degut a la Segona Guerra Mundial i a l'entrada de Fermi en el projecte Manhattan, després de fugir a Estats Units aprofitant l'entrega del premi Nobel que va rebre el 1938 per les seves "demostracions de l'existència d'elements radioactius nous produïts per la radiació amb neutrons i pels seus descobriments relacionats amb les reaccions nuclears degudes als neutrons lents" (Hernández-Fernández, 2013). Fermi, com tots els investigadors integrats al projecte Manhattan, no podia publicar obertament els seus treballs durant aquell període. Va ser una època on la Humanitat va descobrir que podia autodestruir-se, gràcies a aquell producte dels avenços de la física, després que les primeres bombes atòmiques enlluernessin el cel amb aquells terrorífics i fatals *bolets*. Perquè **mirant aquell cel** atòmic l'ésser humà va ser conscient per primera vegada de que la seva destrucció immediata era possible.

La paradoxa de Fermi (1945-1954): galàxies i extraterrestres

Cecil Powell (1903-1969), Cesar Lattes (1924-2005), i Giuseppe Occhialini (1907-1993), quan estudiaven els rajos còsmics mitjançant la tècnica d'exposició d'emulsions fotogràfiques, van ser capaços de detectar el 1947 el primer autèntic mesó, el mesó π o pió, analitzant els fenòmens de desintegració i creació de partícules que es donen en els rajos còsmics (Hernández-Fernández, 2013). En paral·lel, els físics volien reproduir en els seus laboratoris els fenòmens que, de forma 'descontrolada', com els rajos còsmics, es donaven a l'Univers. La física d'altres energies s'havia iniciat, i la febre dels acceleradors de partícules va contagiar als físics de tot el món. Fermi no va ser una excepció. A poc a poc la llista de partícules augmentaria, a mesura que es va poder jugar més amb el món quàntic.

Estudiar la radiació còsmica va obligar a Fermi a tornar a mirar al cel. El Cosmos l'esperava de nou per deixar-se llegir, llançar-li uns quants interrogants i donant-li algunes

respostes. Els experiments de Powell, Lattes i Occhialini van animar als investigadors de Berkeley a produir en els seus acceleradors pions positius, negatius i neutres i a començar a observar la seva interacció amb la matèria: quin tipus d'interaccions eren fortes i quines febles? Quines partícules n'eren elementals, és a dir, la base sobre la qual es podien obtenir totes les altres? S'havia llançat la carrera cap al descobriment de tot un reguitzell de noves partícules. Fermi es va centrar en esbrinar quines de les partícules que arribaven del cel eren “elementals” i quines no. Aquesta creença en l'existència de “partícules elementals” aviat va perdre fonament a mesura que noves partícules eren ràpidament descobertes i es trobava tot un ecosistema de partícules. Fermi no volia pecar de reduccionista i desestimà la idea de partícules elementals que, un llavors jove company a Los Álamos, Richard Feynman (1918-1988), entre d'altres, reprendria anys més tard quan es van descobrir els quarks.

Va ser una època a la que la comunitat científica explorava el flux de partícules diverses que procedia de la radiació còsmica, i que era capaç, en la seva interacció amb el camp magnètic terrestre, de crear fenòmens meteorològics tan espectaculars com les aurores boreals i australs. Els físics de partícules s'enfilaven a les muntanyes amb els seus detectors, que fins i tot elevaven amb globus aerostàtics, i estudiaven les plaques fotogràfiques pujades als globus, tot per “caçar” alguna nova peça quàntica provinent del Cosmos. Així en 1947 es van descobrir també altres partícules en els raigs còsmics, com els kaons o els hiperons, autèntiques desconegudes i que no es van començar a comprendre fins a alguns anys després (Hernández-Fernández, 2013).

Fermi es preocupava sempre per l'arrel dels problemes i davant l'allau de noves partícules detectades en la radiació còsmica la pregunta simple a resoldre era: d'on sorgeixen els raigs còsmics? Va demostrar de nou la seva capacitat excepcional de generalització en el seu article "*On the origin of Cosmic Radiation*"¹⁰, publicat el 1949, en què Fermi va proposar una teoria sobre els rajos còsmics que, produïts en les reaccions nuclears de les estrelles, s'acceleraven a l'espai sota l'acció dels forts camps electromagnètics estel·lars i galàctics (Fermi, 1949). Fermi intuï que aquests rajos havien de ser anàlegs als que l'ésser humà havia pogut provocar en els seus ciclotrons però de moltíssima més intensitat. La seva teoria tenia encara alguns punts febles, ja que no resolvia de forma senzilla el comportament dels nuclis pesants trobats a la radiació còsmica.

Al cap i a la fi els físics estaven descobrint que arribaven al nostre planeta molts rajos còsmics amb partícules desconegudes fins a la data i moltes ones electromagnètiques que potser amagaven algun missatge d'alguna llunyana -i avançada- civilització alienígena. Algunes simples estimacions de Fermi, basades en les probabilitats del desenvolupament de la vida intel·ligent en algun dels planetes de les miríades d'estrelles de l'univers, donaven altes possibilitats de rebre senyals d'extraterrestres, i fins i tot visites. Així es va anar gestant el concepte de la paradoxa de Fermi, que és la contradicció entre les estimacions que afirmen que n'hi ha una alta probabilitat d'existència de civilitzacions intel·ligents en el nostre Univers, i l'absència d'evidències d'aquestes civilitzacions.

La paradoxa de Fermi va sorgir en una conversa informal durant un dinar a *Los Álamos*, a l'estiu de 1950, entre Fermi, Teller i els seus col·laboradors Emil Konopinski (1911-1990) i Herbert York (1921-2009). Els quatre s'estaven divertint mirant una vinyeta d'una invasió extraterrestre que el dibuixant Alan Dunn (1900-1974) havia publicat al *New Yorker Magazine* (figura 1), mentre discutien sobre els informes de suposats OVNI, un tema molt de moda. Després d'una estona de rialles, Fermi es va posar seriós i va

¹⁰ "Sobre l'origen de la radiació còsmica" (Fermi, 1949).

començar a realitzar alguns càlculs ràpids en un tovalló, el que s'anomena ara una estimació de Fermi, que s'avançava en la seva concepció al que més tard es coneixeria com a equació de Drake, una fórmula per a fer una estimació estadística de la probabilitat d'existència de civilitzacions extraterrestres (Hernández-Fernández, 2013).

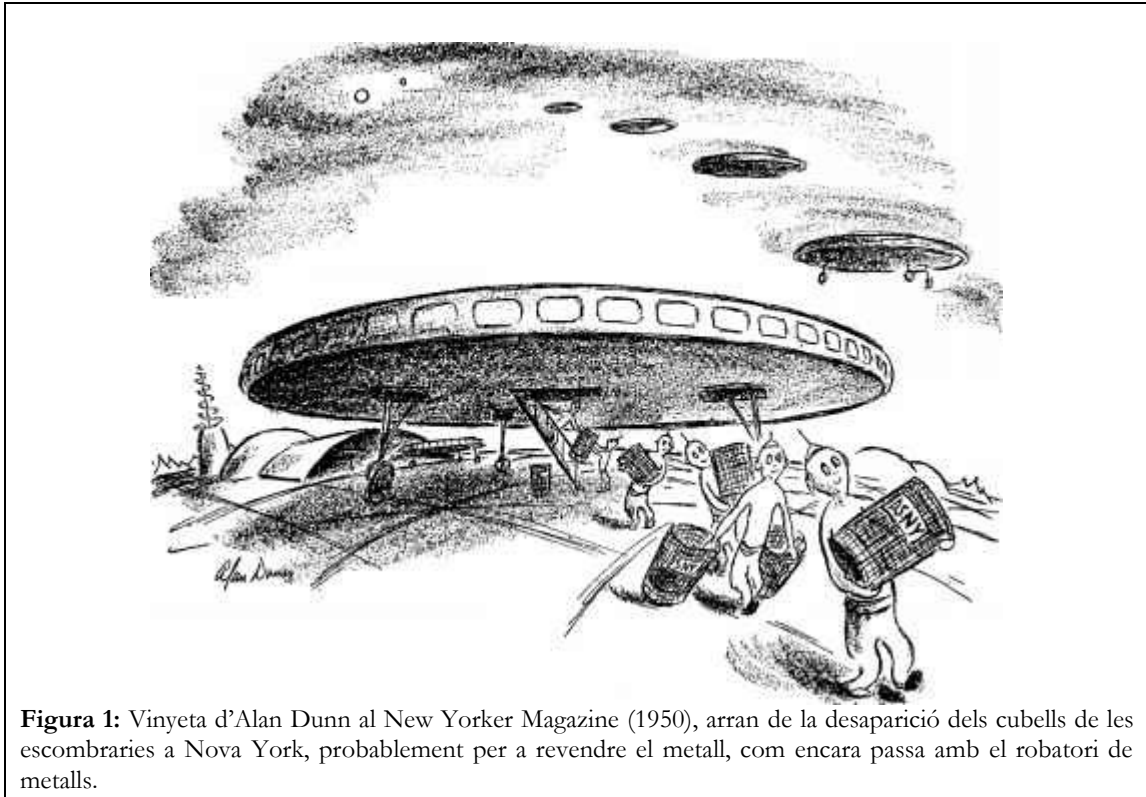


Figura 1: Vinyeta d'Alan Dunn al New Yorker Magazine (1950), arran de la desaparició dels cubells de les escombraries a Nova York, probablement per a revendre el metall, com encara passa amb el robatori de metalls.

Segons Fermi, si el Sol és una estrella jove i n'hi ha bilions d'estrelles a la nostra galàxia, la majoria molts milions d'anys més velles, i si la Terra és un planeta típic, i per tant algunes d'aquestes estrelles antigues contenen planetes amb vida intel·ligent, i alguns d'aquests planetes alberguen civilitzacions que poden potencialment realitzar viatges interestel·lars, els extraterrestres haurien d'haver-nos visitat a la Terra i fins i tot haver-nos colonitzat. Però, "si els extraterrestres existeixen, on són tots ells?", es diu que va afirmar Fermi després de concloure el seu raonament. Fermi, a més, afegia, que en el nostre Univers n'hi ha milions de galàxies a més de la nostra. La paradoxa estava servida: segons l'estimació de Fermi, la probabilitat de que ens visitin extraterrestres és molt elevada i en canvi no en tenim cap evidència empírica al respecte.

L'existència de vida extraterrestre sens dubte era (i segueix sent) un *problema de Fermi*. Les dades de què disposem són minses, s'han realitzat alguns càlculs sobre les probabilitats d'existència de vida, i poc més. El que va començar sent una estimació de Fermi, amb els anys es va anar estudiant més a fons, fins al punt que el govern dels Estats Units va finançar finalment, dècades més tard, el desenvolupament del projecte SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*).

D'altra banda, Fermi seguia de prop els avenços en astrofísica, especialment tot el referent als raigs còsmics, però després dels seus treballs sobre fluids va començar a interessar-se també per fenòmens de la dinàmica dels gasos en l'espai: per què les galàxies tenen la forma que tenen? Com influeixen els camps electromagnètics i gravitatoris als gasos galàctics i estel·lars? Va ser llavors quan va col·laborar amb Chandrasekhar, que

treballava casualment també a Chicago des de 1937, i al qual coneixia del Projecte Manhattan i d'haver llegit els seus treballs previs. En 1953, Fermi i Chandrasekhar van publicar diversos articles en el *Astrophysical Journal* on van analitzar el camp magnètic en les galàxies espirals, així com les inestabilitats gravitacionals en la presència dels forts camps electromagnètics de les estrelles (Bernardini & Bolonis, 2004). Fermi i Chandrasekhar varen demostrar finalment que l'equilibri del gas interestel·lar estava directament relacionat amb el camp magnètic de la galàxia i era l'origen de la radiació còsmica, que tants maldecaps els hi havia donat.

El 28 d'agost de 1953, recomanat per Chandrasekhar, Fermi va ser el primer "no astrònom" a presentar una ponència en la Societat Americana d'Astronomia. Era el reconeixement a tota una carrera on Fermi realment mai havia deixat de mirar el cel.

El llegat de Fermi

La seva contribució cabdal a l'astrofísica moderna va ser reconeguda per la comunitat científica internacional (Segrè, 1972) i, a tal efecte, el telescopi de rajos gamma posat en òrbita el 2008 va ser batejat amb el seu nom i actualment es conegut com a "telescopi Fermi". També el Laboratori Nacional de física d'altres energies de Batavia, a prop de Chicago, s'anomena Fermilab en honor a Fermi, com a pioner en aquest camp. Perquè Enrico Fermi, sens dubte, va ser un físic total capaç de situar l'astrofísica al lloc que li corresponia a la ciència moderna i, com hem vist, va saber mirar al cel per connectar el món atòmic, la física de partícules i l'univers astronòmic.

Referències

BERNARDINI C. & BONOLIS, L. (Eds.) (2004), *Enrico Fermi. His Work and Legacy*, Bolonia, Springer/Società Italiana di Fisica.

FERMI, E. (1921a), «Sull'elettrostatica di un campo gravitazionale uniforme e sul peso delle masse elettromagnetiche», *Il Nuovo Cimento*, 22, 176-188. Disponible a: http://fisica.unipv.it/percorsi/pdf/NCFermi1921_22_176.pdf [3 de març de 2018]

FERMI, E. (1921b), «Sulla dinamica di un sistema rigido di cariche elettriche in moto traslatorio», *Il Nuovo Cimento*, 22, 199-207. Disponible a: http://fisica.unipv.it/percorsi/pdf/NCFermi1921_22_199.pdf [3 de març de 2018]

FERMI, E. & RASETTI, F. (1925), «Effect of an Alternating Magnetic Field on the Polarisation of the Resonance Radiation of Mercury Vapour», *Nature*, 115, 764, doi:10.1038/115764b0

FERMI, E. (1926), «Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico», *Rend. Lincei*, 3, 145-149.

FERMI, E. (1928), «Sulla deduzione statistica de alcune proprietà dell'atomo. Applicazione alla teoria del sistema periodico degli elementi», *Rend. Lincei*, 7, 342-346.

- FERMI, E. (1933), «Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi "beta"», *La Ricerca Scientifica*, 4 (2), 491-495.
- FERMI, E., TELLER, E. & WEISKOPF, V. (1947), «The decay of negative mesotrons in matter», *Physical Review*, 71, 314-315.
- FERMI, E. & TELLER, E. (1947), «The capture of negative mesotrons in matter», *Physical Review*, 72, 1139-1146.
- FERMI, E. (1949), «On the origin of Cosmic Radiation», *Physical Review*, 75, 1169-1174.
- FOWLER, R.H. (1926), «On dense matter», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 87, 114-122. DOI:0.1093/mnras/87.2.114
- HERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, A. (2013), *Fermi. La energía nuclear*, Barcelona, RBA, colección Grandes Ideas de la Ciencia.
- HERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, A. (2014), El origen de la física moderna: el papel de Fermi. *Encuentros multidisciplinares*, vol. XVI, núm. 47, 12-20.
- SEGRÈ, E. (1972), *Enrico Fermi, Physicist*. Chicago, The University of Chicago Press, 1972.